

УДК 621.3

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТЕРМИНАЛАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

**С. Е. Шендер<sup>1</sup>, А. В. Паздерин<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> s.e.shender@urfu.ru

**Аннотация.** В работе представлен сравнительный анализ методов расчета параметров векторов тока и напряжения на базе дискретного преобразования Фурье (ДПФ), а также с применением операции квадратурного умножения. Проанализированы метод расчета частоты по скольжению фазы и метод фазовой автоподстройки частоты. Рассмотрена возможность совершенствования классического преобразования Фурье путем введения в его вычислительный тракт гибкой обратной связи по частоте. Показано, что метод на базе операции квадратурного умножения является более предпочтительным с точки зрения времени реакции вычислителя, погрешности однородности переходного процесса.

**Ключевые слова:** релейная защита и автоматика, векторные измерения, ортогональные составляющие, моделирование алгоритмов

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATION OF CURRENT AND VOLTAGE VECTORS PARAMETERS ON MICROPROCESSOR TERMINALS OF RELAY PROTECTION AND EMERGENCY AUTOMATION

**S. E. Shender<sup>1</sup>, A. V. Pazderin<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Ural Federal University named after the First  
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> s.e.shender@urfu.ru

**Abstract.** The paper presents a comparative analysis of methods for calculating the parameters of current and voltage vectors based on DFT, as well as using the

operation of quadrature multiplication. The method for calculating the frequency from the phase slip and the method of phase-locked loop frequency are analyzed. The possibility of improving the classical Fourier transform by introducing a flexible frequency feedback into its computational path is considered. It is shown that the method based on the operation of quadrature multiplication is more preferable from the point of view of the reaction time of the calculator, the error in the homogeneity of the transient process.

**Keywords:** relay protection and automation, vector measurements, orthogonal components, modeling algorithms

Большая часть алгоритмов релейной защиты и противоаварийной автоматики в качестве входных параметров использует векторы токов и напряжений. Векторы могут быть поданы в алгоритм как в алгебраической, так и в тригонометрической формах. Алгоритм расчета ортогональных составляющих вектора на базе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) заключается в выполнении ДПФ исследуемого сигнала и синусоиды базовой частоты с последующей их круговой сверткой.

Базовая синусоида генерируется по формуле:

$$y(t) = \sin(2\pi f_{\text{ном}} n T_d). \quad (1)$$

Дискретное прямое преобразование Фурье реализуется следующим образом [1]:

$$S(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{\frac{-j2\pi nk}{N}}. \quad (2)$$

Свертка производится по теореме о свертке [2]:

$$Y_w = \dot{Y}_{w1} \hat{Y}_{w2}. \quad (3)$$

Алгоритм расчета ортогональных составляющих вектора с использованием операции квадратурного умножения заключается в выполнении умножения отсчетов выборки входного сигнала на отсчеты опорного синуса и косинуса. В результате умножения имеем:

$$\begin{aligned} \text{Re}(t) &= \sin(\omega_0 t) X_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \frac{X_m}{2} \left[ \cos((\omega_0 - \omega)t - \varphi_0) - \cos((\omega_0 + \omega)t + \varphi_0) \right] \\ \text{Im}(t) &= \cos(\omega_0 t) X_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \frac{X_m}{2} \left[ \sin((\omega_0 - \omega)t - \varphi_0) - \sin((\omega_0 + \omega)t + \varphi_0) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве сглаживающей оконной функции используется окно Дольфа — Чебышева с настраиваемым уровнем боковых лепестков

спектра. На практике принято использовать следующую расчетную формулу частоты [3]:

$$f = f_{\text{ном}} + \frac{d(\Delta\delta)}{dt} \cdot \frac{1}{2\pi}. \quad (5)$$

Разностный угол двух соседних векторов вычисляется по формуле:

$$\Delta\delta = \tan^{-1}(\dot{V}[n]\hat{V}[n-1]). \quad (6)$$

При реализации формулы (6) в терминалах микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) она переписывается в ортогональных составляющих следующим образом:

$$\Delta\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Re}[n]\text{Im}[n-1] - \text{Re}[n-1]\text{Im}[n]}{\text{Re}[n-1]\text{Re}[n] + \text{Im}[n-1]\text{Im}[n]}\right). \quad (7)$$

Скольжение, получаемое в формуле (5), следует фильтровать при помощи фильтра нижних частот (ФНЧ). В нашем случае используется КИХ фильтр (фильтр с конечной импульсной характеристикой), рассчитанный методом оконного сглаживания.

Вычислительный контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) представляет собой следящую систему автоматического регулирования, выполняющей подстройку частоты опорного сигнала по отклонению фазы входного сигнала от фазы опорного сигнала.

В качестве выходного фильтра был использован БИХ фильтр (фильтр с бесконечной импульсной характеристикой) второго порядка с частотой среза в 10 Гц и коэффициентом демпфирования 0,9.

Имитация работы описанных алгоритмов расчета частоты и ортогональных составляющих производилась в прикладном комплексе Simulink. Частоты дискретизации выборки и результатов расчета были выставлены такими же, как на устройстве РЗА типа УСВИ ТПА-01 производства ООО «Прософт-Системы».

Скольжение считается через ортогональные составляющие по формуле (7). Далее оно фильтруется КИХ фильтром 10-го порядка с частотой среза 60 Гц. Входной сигнал вместе с опорным раскладывается в ряд Фурье. Далее производится круговая свертка спектров входного сигнала и опорного, в результате чего получаются ортогональные составляющие и фазовый угол входного сигнала относительно опорного сигнала. Частота считается по скольжению фазы и заводится обратной связью в блок ДПФ входного сигнала.

Таким образом, алгоритм вычислителя на базе операции квадратурного умножения имеет более однородный переходный процесс, нежели вычислитель на базе ДПФ. Это обусловлено тем, что вычислитель на базе ДПФ использует гибкую обратную связь по частоте, что приводит к непрерывному изменению периода разложения входного сигнала и, соответственно, скачкам фазы, амплитуды и частоты. При этом в вычислителе на базе операции квадратурного умножения указанных неоднородностей не наблюдается ввиду полной независимости трактов вычисления частоты и ортогональных составляющих. Однако в вычислителе на базе операции квадратурного умножения могут наблюдаться погрешности измерения амплитуды, а также ее флуктуации на крайних рабочих частотах [45; 55] Гц, связанные с неполным подавлением сигнала удвоенной частоты и завалами амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) квадратурных фильтров. С практической точки зрения вычислитель на базе операции квадратурного умножения является наиболее предпочтительным с точки зрения времени реакции, погрешности однородности переходного процесса. Проблемы, связанные с завалами АЧХ квадратурных фильтров и флуктуацией амплитуды на крайних рабочих частотах в [45; 55] Гц могут быть решены путем использования специальных компенсационных функций и (или) подстройкой ширины окна наблюдения.

#### **Список источников**

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М. : Мир, 1978. 848 с.
2. Теория и практика цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dsplib.ru/index.html> (дата обращения: 25.11.2020).
3. Документация MATLAB [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.exponenta.ru/matlab/index.html> (дата обращения: 25.11.2020).